第47卷 第2期
2024年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 2
Feb. 2024

中国省域经济韧性与生态效率测度及其协同演化分析

周 霞， 王 佳

（北京建筑大学城市经济与管理学院，北京 100044）

摘 要：统筹经济韧性与生态效率间的动态平衡关系是实现区域可持续发展的重要抓手。以中国30个省份为研究对象，采用组合权重模型、全局非期望超效率SBM模型分别测度国内省级区域适应性循环理论与驱动-压力-状态-响应（DPSR）模型分析框架下的经济韧性、投入产出理论下的生态效率，并通过改进的哈肯模型刻画经济韧性与生态效率间的协同演化特征。结果表明：（1）经济韧性能力在样本观测期内显著上升，区域差异明显扩张，南北区域发展不平衡，存在一定的"东-中-东北-西"阶梯效应。（2）生态效率水平总体呈下降的趋势，区域差异历经"扩张-缩小-再扩张"变化，存在显著性阶梯失衡现象，空间呈"沿海-内陆"递减分布。（3）经济韧性与生态效率的协同演化历经稳定、下降及稳定三阶段，区域间基本不存在阶梯性失衡现象，经济韧性作为协同演化的序参量，主导区域可持续发展。

关 键 词：经济韧性；生态效率；协同演化；全局非期望超效率SBM模型；中国

文章编号：1000－6060(2024)02－0319－13(0319～0331)

经济韧性和生态效率是经济社会朝向高可持续性发展的关键要素。当前，国内经济刘易斯发展模式动能减弱，三期叠加影响持续深化，再加之外部不确定性冲击高频化，经济发展面临着"需求收缩、供给冲击、预期转弱"三重压力。原有单一线性思维和静态管理框架已无法应对城市经济发展的内外安全问题，亟需韧性理念引领城市经济系统稳健发展。同时，城市正处于经济增长、资源约束收紧和环境保护三者间的两难境地[1]，平衡环境、经济、资源三者关系以协调发展天-地-人系统，是城市高质量发展的迫切需求。经济韧性表现为城市经济在遭受急性冲击或慢性压力时能够及时有效地抵抗、吸收风险，并通过学习、适应进行持续性结构调整以实现可持续发展的能力。高韧性经济体能在遭受冲击时快速抵抗恢复以保障经济正常运转，为生态效率的提升提供支撑保障作用[2]，而低韧性经济体往往在受到冲击后难以快速恢复，生态效率将受到严重影响[3]。生态效率强调以最小的资源投入和环境破坏获得最大的期望产出，能够促进技术进步，提升资源配置效率和质量，降低资源环境风险和生态缺陷[4]，从而提升经济韧性。党的二十大指出要坚持以经济安全为基础，着力提升产业链及供应链韧性和安全水平，同时要推动绿色发展，促进人与自然和谐共生，并实施全面节约战略，推进各类资源节约集约利用[5]。由此可见，如何在追求经济韧性稳定增长的同时保持生态效率的稳步提升成为重大的现实议题。

韧性理念总体上历经工程韧性-生态韧性-演进韧性的迭代，实现了由追求稳定性均衡到探索适应性发展的跨越。目前，现有研究多基于过程和状态对经济韧性进行测度。基于过程测度常利用就业、失业数据或GDP等某一核心变量在冲击波动期间实际值与预期值间的缺口率进行表征[6]，需设置参考基准状态以有效识别外来冲击[7]，侧重经济体对短期剧烈冲击的抵抗与恢复能力[8]。该方法忽视了"慢性燃烧"对于经济结构的影响，相似的经济冲

收稿日期：2023-04-15； **修订日期**：2023-05-11

基金项目：北京社会科学基金项目（19GLB016）；北京建筑大学建大杰青项目（JDJQ20200305）；北京建筑大学研究生创新项目（PG2023104）资助

作者简介：周霞（1975-），女，教授，主要从事区域经济等方面的研究. E-mail: zhouxia@bucea.edu.cn

通讯作者：王佳（1999-），男，硕士研究生，主要从事区域经济等方面的研究. E-mail: wangjia@cumt.vip

击对于不同地区不一定同时发生[9]，并且区域经济变化阶段的划分具有一定的随意性，单一指标进行韧性测度具有特殊性与异质性，容易产生偏误[10]。基于状态测度则多从资源要素、韧性特征与阶段等角度进行综合评价指标体系的构建，能够全面表征经济韧性的内涵特征与维度[6]，但具体衡量的指标有所差异。生态效率最早由Schaltegger等[11]提出，而后逐步被应用到宏观省市区域[12]、中观行业[13]、微观企业及产品[14]等领域。学界多采用综合指标法进行测度。测度方法依照是否可知生产函数具体形式分为参数与非参数2种。参数模型以由Meeusen等[15]提出的随机前沿分析（SFA）为代表。非参数模型以由Charnes等[16]首次提出的DEA模型为典型代表。现阶段多将经济韧性与生态效率作为独立对象进行研究，缺乏两者间协调发展关系的探究。基于此，本文将两者作为相关联的系统对中国省域进行实证研究，基于适应性循环理论与驱动-压力-状态-响应（Driving-Pressure-State-Response，DPSR）模型、投入产出理论，考虑创新质量、“双碳”约束及通胀因素，构建经济韧性及生态效率的测度体系，并分析经济韧性及生态效率的时序和区域变化。进一步，引入改进的哈肯模型探析经济韧性和生态效率间的协同关系及演化特征，以期为促进经济高质量发展提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 经济韧性评价模型

1.1.1 指标体系 基于韧性发生学，引入DPSR模型并结合适应性循环理论，构建经济韧性评估框架（图1）。经济韧性是一个动态演化过程，存在适应循环周期，系统组件间具有复杂的反馈和自组织相互作用，强调经济系统在应对内生性及外源性扰动冲击时是动态变化的，能够建立并增强自身适应学习能力，通过调整自身结构与状态来适应冲击扰动。每个适应循环周期可分为开发、维持、释放及重组等阶段[18]。为推动城市繁荣，实现一部分人先富向共同富裕的跨越，更好满足人民对美好生活的向往，经济系统进入快速发展的开发阶段，内部联系和资本累积逐步增强，产业规模效应递增而步入积极的路径依赖，系统韧性得以提升并逐渐达到最大；而在维持阶段，资源将持续累积，经济系统潜力值达到顶峰，内部联系过密而承受诸多压力，发展逐步僵硬，路径依赖由积极转为消极，韧性下降；系统遭受冲击而失衡并快速步入释放阶段，冲击使得经济处于结构衰退、增长乏力、内部联系度下降等特定状态，但由于旧生产模式和制度形式被打破，过度累积的资本得以释放，新资源利用及经济转型具备现实可能性，韧性逐步回升；资源的释放为系统内部的资本、结构及组织方式进行实验与创新重组提供机会，经济发展进入重组阶段，新经济活动不断涌现与消失，适应新环境的经济企业、结构、组织等逐步转入开发阶段，韧性得以提升。基于该研究框架，从开发驱动、维持承压、抵抗释放及恢复重组4个维度对中国省域经济韧性进行评估（表1）。经济发展的根本目的在于促进城市繁荣发展，实现共同富裕，满足人民美好生活的向往，从人口总量、城镇化水平、生活消费等维度表征开发驱动。维持承压主要指经济系统在面对内外源不确定性常态化风险时表现的脆弱性，包括外贸依存、失业风险、金融风险等方面。抵抗释放指区域经济系统的经济规模、产业结构、资产投资、消费零售、社会保障等方面在面对内外压力干扰过程中的一系列状态变化。恢复重组是指在风险过后经济系统实现经济复苏的恢复、创新及转型能力，反映了经济系统自我学习调整、更新创造路径以实现经济转型的潜力。

1.1.2 组合权重模型 CRITIC模型使用指标的对比强度和冲突性来确定权重，可有效避免权重确定过程中的人为干扰。其中，冲突性由相关系数表示，实际可能出现负值，故对指标相关系数取绝对值处理。同时，CRITIC模型不能衡量数据离散程度，而熵值法是基于信息熵原理及变异系数来确定权重，突出指标间的离散程度。因此，构建由CRITIC模型和熵值法相结合的组合权重模型，能够有效弥补各自不足，具体计算公式参见文献[19]。

1.2 生态效率评价模型

1.2.1 生态效率指标体系 以投入产出理论为基础，通过文献归纳总结构建城市生态效率的测度模型（表2）。生态效率作为架起资源、经济及环境三者关系的桥梁，包括实际资源利用投入、经济效益及环境损失等部分。其中，参考经典经济增长理论中的生产函数模型并结合相关研究，综合选用劳动

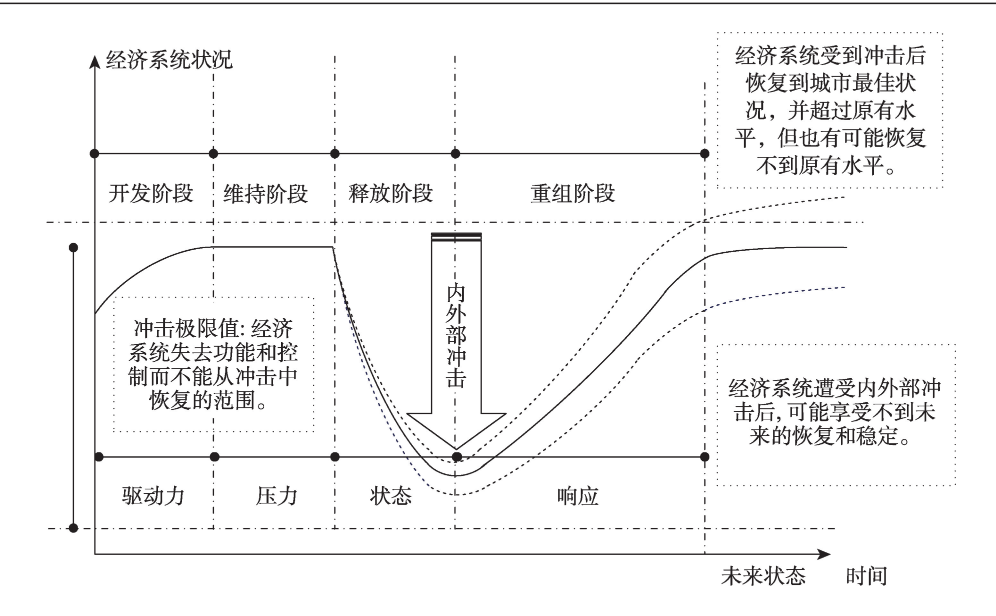


图1　基于适应性循环理论与DPSR模型的经济韧性分析框架（根据文献[17]改编）

Fig. 1　An analytical framework for economic resilience based on adaptive cycle theory and the DPSR model (adapted from literature[17])

表1　基于适应性循环理论与DPSR模型的经济韧性评价指标体系

Tab. 1　Evaluation index system of economic resilience based on adaptive cycle theory and the DPSR model

指标类别	准则层	指标层	指标含义及方向	权重
开发驱动	人口总量	常住人口	美好生活向往基数(+)	0.06757
	城镇化水平	城镇化率	常住人口城镇化率(+)	0.03520
	生活消费	城镇恩格尔系数	城镇居民消费水平(−)	0.03729
	生活消费	农村恩格尔系数	农村居民消费水平(−)	0.04408
维持承压	外贸依存	外贸依存度*	城市贸易压力(−)	0.04112
	失业风险	城镇登记失业率	失业对经济的冲击(−)	0.02680
	金融风险	金融机构贷存比	金融机构流动性风险(−)	0.04586
抵抗释放	经济规模	人均GDP*	经济发展的稳定性(+)	0.04943
	产业结构	产业结构多样化指数	经济稳定器(+)	0.04281
	社会保障	失业保险参保人员/就业人数	社会保障能力(+)	0.05720
	资产投资	固定资产投资*	地区投资规模(+)	0.07746
	消费零售	社会消费品零售总额*	地区市场规模(+)	0.06833
恢复重组	资源调配	一般公共预算收入*	政府调动资源的能力(+)	0.06638
	居民抵抗力	人均可支配收入*	反映居民抗风险能力(+)	0.04887
	资本投入	科学技术投入*	创新投入水平(+)	0.09309
	成果数量	专利申请受理数	创新成果产出水平(+)	0.11595
	成果质量	专利申请质量	创新成果产出质量(+)	0.04952
	储备力量	每万人高等在校学生数	人力资本水平(+)	0.03306

注："+"表示正向指标，"−"表示负向指标；*表示该指标考虑通货膨胀因素。下同。

力、资本、能源、土地及水资源等要素作为满足城市生产基本条件的资源投入。经济效益则为城市经济生产活动提供的产品及服务所转化出的价值量，通常由国民生产总值反映。环境影响作为非期望产出，实质上是资源要素投入与经济产出间的物质差，通常以气液固三态形式排放到自然界中。现有研究多选用"三废"排放量衡量非期望产出，但现固体废物处理系统较为完备。2019年，全国一般工业固体废弃物倾倒丢弃量仅占产生量的0.003%，环境影响程度低。同时，为凸显低碳化是高质量发展的关键环节，综合选用工业废水、SO_2、烟尘及CO_2排放量来衡量非期望产出。

表2 基于投入产出理论的生态效率评价指标体系

Tab. 2 Evaluation index system of eco-efficiency based on the input-output theory

指标类别	准则层	指标层	单位	具体说明
投入	经济要素	资本存量	10^8元	永续盘存法
		年末就业人数	10^4人	劳动力投入
	自然资源	建设用地面积	km^2	土地投入
		能源消耗总量	10^4 t标准煤	能源投入
		用水总量	10^8 m^3	水资源投入
产出	期望产出	实际地区生产总值*	10^4元	经济产出
	非期望产出	工业废水排放量	10^4 t	液态
		烟尘排放量	10^4 t	固态
		SO_2排放量	10^4 t	气态
		CO_2排放量	10^4 t	气态

1.2.2 全局非期望超效率SBM模型 2001年，Tone[20]提出SBM模型，将非径向松弛变量纳入目标函数，超越了径向和线性分段理论的限制，通过考虑非期望产出，有效解决了传统径向和角度的DEA模型易导致投入产出要素“拥挤”或“松弛”的问题[21]，但无法分析生产前沿面上有效决策单元的效率差异性。因此，Tone[22]结合超效率DEA模型和SBM模型的优势，进一步提出超效率SBM模型，实现了对有效决策单元的区分。同时，为使得同一决策单元的不同年份生态效率值具有可比性，以全部数据构建唯一的生产前沿面，利用Matlab软件实现，具体计算公式参见文献[23]。

1.3 改进的哈肯模型

由赫尔曼·哈肯提出的哈肯模型是用于分析复杂系统有序度的重要模型，通过消除快变量以识别序参量来研究系统自组织过程中的演化机制与演化趋势。在系统非线性动态演进过程中，主导系统总体演化进程的子系统、参量或因素被称为慢参量，即系统的序参量。受到序参量役使的子系统、参量或因素被称为快参量。具体建模步骤如下：

（1）提出假设并构造运动方程。假设在2个系统中，q_1为序参量，q_2为受到序参量控制的快变量，则二者协同发展的运动方程（$\dot{q}_1$、$\dot{q}_2$）为：

$$\dot{q}_1 = -\lambda_1 q_1 - a q_1 q_2 \quad (1)$$

$$\dot{q}_2 = -\lambda_2 q_2 + b q_1^2 \quad (2)$$

式中：λ_1和λ_2为2个子系统的阻尼系数；a和b为有关变量的回归系数。

（2）求解参数并检验是否满足“绝热近似假设”条件：$\lambda_2>0$，且$|\lambda_2| \gg |\lambda_1|$。若满足，则$q_1$为序参量，否则重新构造系统运动方程。

（3）求解系统演化方程。瞬间撤去q_2，序参量q_1将来不及变化。令$\dot{q}_2=0$，可得：

$$q_2 = \frac{b}{\lambda_2} q_1^2 \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)，即可得系统演化方程：

$$\dot{q}_1 = -\lambda_1 q_1 - \frac{ab}{\lambda_2} q_1^3 \quad (4)$$

（4）求解势函数。对式(4)求相反数积分，得到反映系统状态的势函数（v）：

$$v = 0.5\lambda_1 q_1^2 + \frac{ab}{4\lambda_2} q_1^4 \quad (5)$$

（5）求解系统得分值。联立式(4)与式(5)，令$\dot{q}_1=0$，可得两系统协同发展的稳定点$[q^*, v(q^*)]$，系统任意状态参量点与稳定点之间的距离决定了系统所处的状态，即系统状态评价函数(d)为：

$$d = \sqrt{(q-q^*)^2 + [v(q)-v(q^*)]^2} \quad (6)$$

哈肯模型创立之初主要用于物理领域，应用在社会经济领域尚有些瑕疵，需要做一些改进[24]：(1)调整运动方程表达形式。由于运动方程是针对连续型随机变量设定的，而社会经济领域变量往往采用离散型的年度数据，因此需要离散化处理。(2)对数化处理。为避免现实社会经济环境中非平稳时间序列数据所产生的“伪回归”问题，需对变量进行对数化处理。(3)增加运动方程常数项。系统会受到随机涨落作用，宏观系统观测量往往围绕平均值上下起伏，并且韧性和效率是区域复合系统的固有属性，即使二者初始为0，通过创新驱动、产业调整等手段亦可能使其发生增长，因此需要增加常数项。经过以上调整，假设经济韧性(JRR)为序参量，则经济韧性(JRR)与生态效率(EGG)间的协同演化方程如下：

$$\ln JRR_{(t)} = (1-\lambda_1)\ln JRR_{(t-1)} - a\ln JRR_{(t-1)}\ln EGG_{(t-1)} + C_1 \quad (7)$$

$$\ln EGG_{(t)} = (1-\lambda_2)\ln EGG_{(t-1)} + b\left[\ln JRR_{(t-1)}\right]^2 + C_2 \quad (8)$$

式中：C_1与C_2为方程常数项；t为时间变量。

1.4 核密度估计

核密度估计常被用于刻画研究对象的动态演化特征，是一种利用平滑曲线估计随机变量密度函数的非参数估计方法。相较于参数方法，其具有稳健性强、模型依赖性弱及无需任何数据分析先验知识等优点，具体计算方法参见文献[25]。

1.5 数据来源与处理

本文数据主要来源于《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国统计年鉴》《全国科技经费投入统计公报》、Wind数据库及各省(直辖市、自治区)统计年鉴。资本存量采用永续盘存法进行计算,以2000年作为基年,经济折旧率取9.6%[26];CO_2排放数据来源于中国碳核算数据库,以IPCC部门法计算[27];外贸依存度以进出口贸易总额×年度平均汇率/国内生产总值进行衡量,汇率数据来源于国际货币基金组织国际金融统计数据集;金融机构贷存比等于各项贷款期末余额/各项存款期末余额;产业结构多样化指数以赫芬达尔-赫希曼指数为基础进行构建,具体计算公式参见文献[28],覆盖农林牧渔、采矿业等19个细分产业;以发明专利授权量/专利授权数作为专利申请质量的代理变量;以2000年为基期,运用居民消费价格指数进行数据调整以消除通货膨胀对外贸依存度、人均GDP等相关指标的影响。

2 经济韧性与生态效率时空特征分析

2.1 省域经济韧性时空分异分析

各地区经济韧性水平及核密度估计如图2所示。(1) 总体上,全国经济韧性前期较为稳定,自2003年后稳步提升,其总体均值由2003年的0.203增至2020年的0.393,年均增幅约5.18%;区域差异呈扩张态势,变异系数由2005年的0.165波动式上升至2020年的0.332。(2) 区域层面上,八大综合经济区经济韧性存在一定的阶梯式失衡①,均值排序为:西北地区<西南地区<长江中游<东北地区<黄河中游<南部沿海<北部沿海<东部沿海,其中西北地区是全国均值的0.75倍,而东部沿海为全国均值的1.30倍。(3) 动态演进上,全国经济韧性总体呈现由低值区向高值区集聚、双峰向单峰过渡的趋势。分布位置上,核密度估计曲线持续右移且波峰区域集中于0.1~0.3之间,表明我国各省韧性水平总体不高但呈现持续增强的特征;分布形态上,曲线由“倒M型”向“倒V型”演进,主峰峰值在观测期间显著下降,曲线宽带逐渐增大,表明各区域经济韧性水平趋于分散;延展性上,曲线右侧拖尾的特征逐渐显现并拉长,意味着韧性较高的省份与整体平均值差距逐渐拉大,绝对差异存在且呈扩大态势;极化趋势上,侧峰逐渐演变成不明显凸起,两极化趋向消失,未来单极化特征愈加明显。

为进一步探究韧性水平空间非均衡特征,通过自然断点法将其分为5类,并选取2001、2011、2020年及2001—2020年4个时间点进行可视化(图3)。(1) 高韧性区域逐渐由北部沿海先向东部及南部沿海、再向黄河中游、长江中游、西南地区波动延伸,空间分异特征明显,总体呈现“东-中-东北-西”梯级分布的特征②。具体来说,东部地区作为经济发展先行区,产业基础夯实,经济规模居前,创新集聚效应明显,逐步成为韧性领先区;中部地区崛起战略成效显著,经济韧性发展总体呈上升趋势,2015年超越东北地区,仅次于东部地区,2020年受疫情影响而略有下降;东北地区工业基础良好,但产业结构失衡,常处于产业链条前端,并且民营经济发展缓慢,因此其经济韧性自2015年上升至峰值后,保持稳定并略有下降;西部地区工业发展薄弱,韧性值常位于全国最低水平。(2) 南北区域③发展不平衡,逐渐由“北强南弱”向“南强北弱”转化。南北区域韧性值总体呈上升态势,但在韧性水平超全国均值的省份中,南方省份所占比例从2001年的33.3%上升到2020年的61.5%。南方改革开放的率先实施刺激经济发展活力快速上升,削弱了北方工业化进程受国家战略、国际形势及资源条件等因素的影响而被快速推进的先天优势,南北区域间的差距逐渐缩小;进入经济新常态以来,北方重化工业依赖度高,产业提档升级进程滞后,而南方由于市场化进程快、对外开放度高、营商环境好、体制改革快等原因,转型升级态势较好,从而导致南北韧性水平差距逐渐扩大。(3) 城市群优势凸显。2011、2020年的高韧性区域均位于长三角、京津冀及珠三角等城市群。

2.2 省域生态效率时空分异分析

各地区生态效率水平及核密度估计如图4所示。(1) 总体上,全国生态效率总体呈下降趋势,其总体均值由2001年的0.651下降至2020年的0.293,降幅约54.95%。(2) 从区域层面看,中国八大综合

① 基于国务院发展研究中心研究将南北区域划分为八大综合经济区,具体参见文献[29]。

② 东中西部按照国家统计局分类标准进行划分。

③ 南北部以秦岭-淮河南北分界线划分。

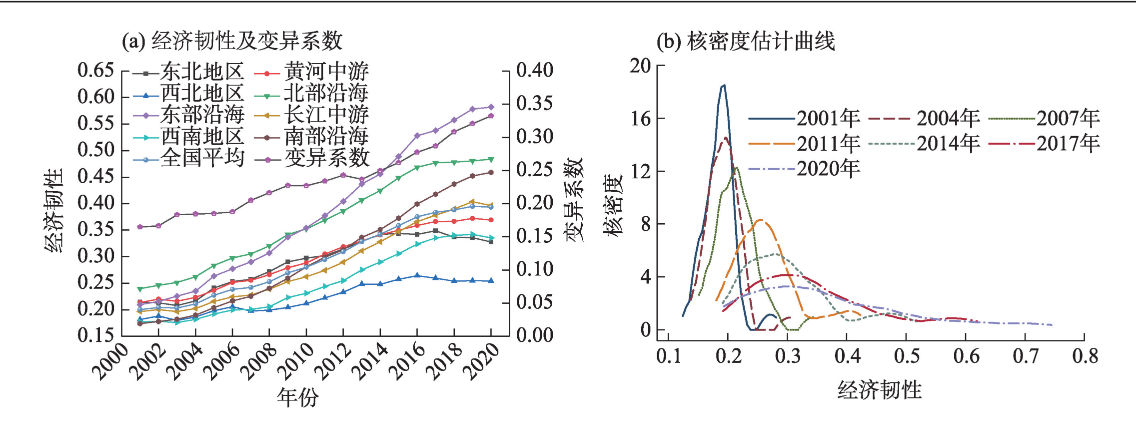


图2　2001—2020年中国省域经济韧性与核密度估计曲线

Fig. 2　Levels of economic resilience and kernel density curves for provincial units in China from 2001 to 2020

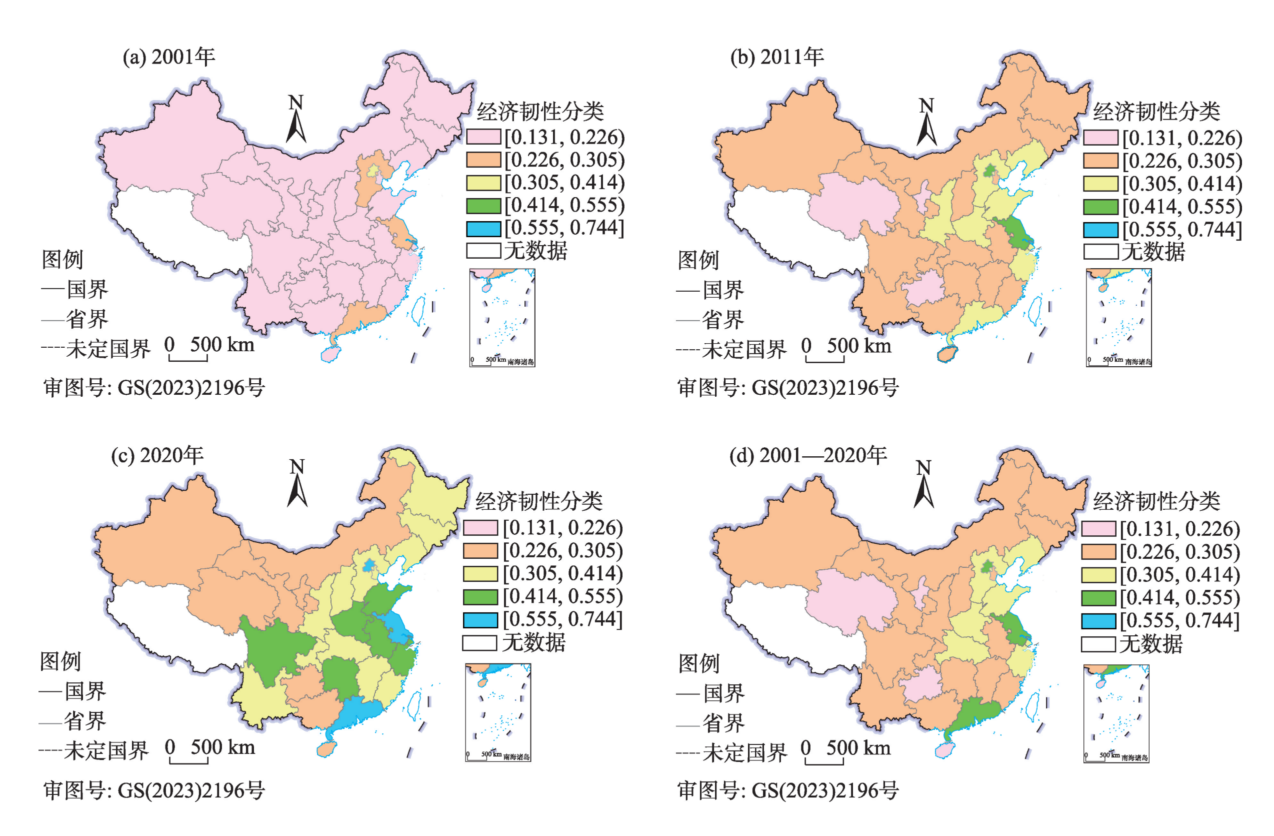


图3　经济韧性的空间分异特征

Fig. 3　Spatial differentiation characteristics of economic resilience

经济区生态效率存在显著性阶梯失衡，均值排序为：西北地区<西南地区<长江中游<东北地区<黄河中游<东部沿海<北部沿海<南部沿海。其中，南部沿海为全国均值的1.61倍，而西北地区仅为全国均值的0.53倍；变异系数曲线呈斜“N”型，说明区域差异呈扩张、缩小再扩张的态势。(3) 动态演进上，生态效率由高值区向低值区聚集。具体来说，分布位置上，核密度估计曲线先左移而后略有右移之势，波峰集中在0.1~0.3之间，表明我国生态效率总体水平不高；分布形态上，前4个年份曲线峰态从“势均力敌”到“一强多弱”，峰值持续增加，曲线带宽逐渐缩小，而后4个年份曲线峰值逐渐降低，表明各区域生态效率间的差异程度先是存在缩小态势，存在动态收敛性特征，而后呈扩大态势；延展性上，曲线右侧拖尾特征逐渐显现而后先变弱后增强，表明绝对差异先缩小后增加。

为进一步探究生态效率的空间非均衡特征，通过自然断点法将生态效率分为5类，并选取2001、

2011、2020年及2001—2020年4个时间点进行可视化(图5)。结合相关数据进行分析可知：(1) 全国生态效率水平总体大范围坍缩。相较于2001年，2011年及2020年的低效率区域在中西部大面积显现。全国生态效率水平可以2009年为界划分为两阶段。前阶段生态效率持续下降，主要原因在于外贸迅速扩张致使资源环境压力迅速增加。而后阶段降速明显下降并趋于稳定，2015年下降至最低值，而后略有上升之势，主要原因在于金融危机过后，粗放型增长模式难以为继，经济逐步向“新常态”过渡，“三期叠加”特征明显，资源高效利用逐渐受到重视，但经济增长模式转换需要过渡期，生态效率值仍可能出现下降但下降速度会趋缓。(2) 东中西差距始终存在，东部引领效应突出。研究期间内的生态效率均值总体排序为：东部地区>中部地区≈东北地区>西部地区。具体来说，东部地区的生态效率值在2001—2015年内呈现明显的下降趋势，说明其仍未完全摆脱粗放型增长方式，长期的出口导向

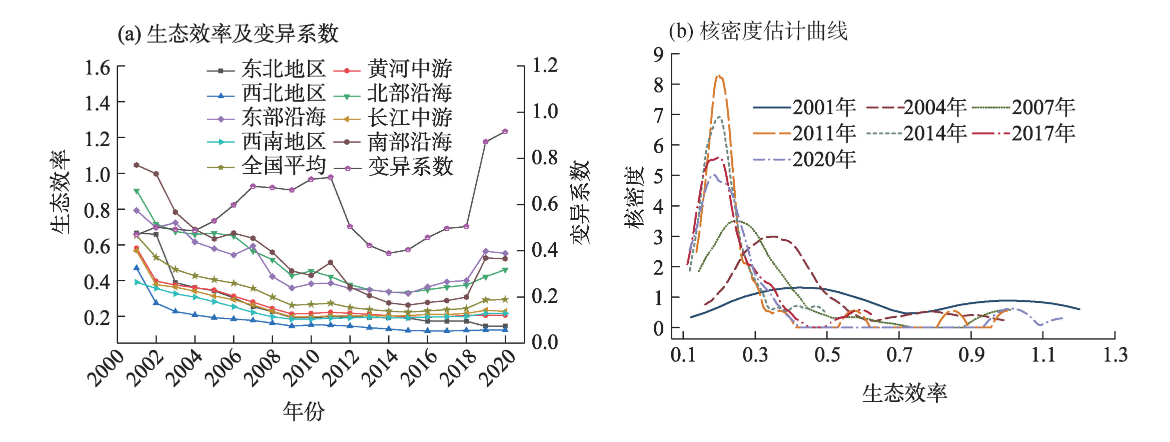


图4　2001—2020年中国省域生态效率及核密度估计曲线

Fig. 4　Levels of eco-efficiency and kernel density curves for provincial units in China from 2001 to 2020

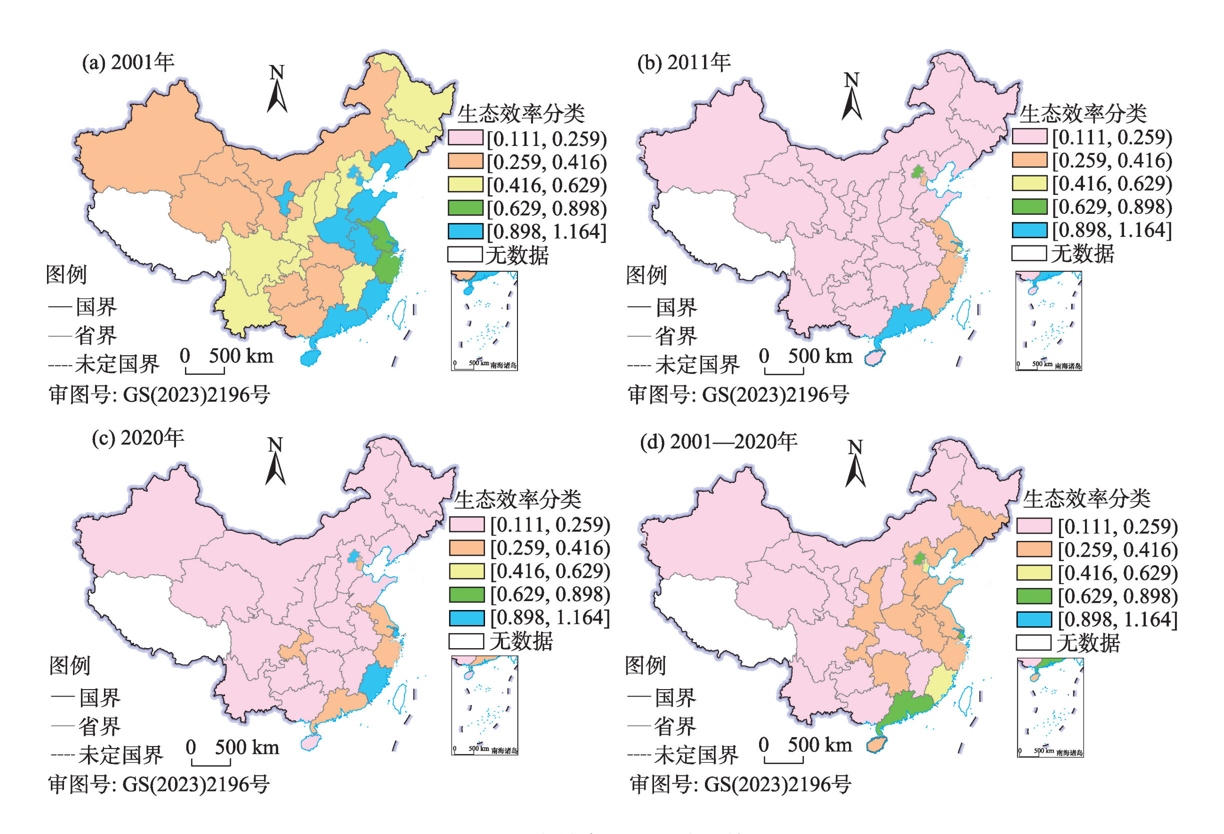


图5　生态效率的空间分异特征

Fig. 5　Spatial differentiation characteristics of eco-efficiency

型增长模式造成了土地日趋紧张、能源难以为继、环境污染等严重后果。同时,受经济结构调整、生态文明建设战略上升、大力推进万众创新等政策的影响,东部地区生态效率于2015年触底后开始逐步上升;而东北地区产业结构单一,经济发展方式较为粗放,“煤炭城群聚”现象突出,忽视了经济发展的质量和环境效益,再加之金融危机后,受国企深化改革滞后、营商环境差、人口流失等因素的影响,产业转型升级较慢,制约了经济发展质量的提升,从而导致了东北地区生态效率由2001年的0.67下降为2020年的0.14,成为全国最低水平;中部地区各省以资源型产业为主,如山西、安徽、湖北等省是国内重要的能源和原材料工业基地,资源高度消耗但经济发展不充分,从而导致生态效率偏低;西部地区随着西部大开发战略的实施,人均GDP虽有所增加,但高耗能产业“东减西增”现象突出,其整体仍处于工业化初期阶段,创新发展动能不足、产业结构低级、绿色技术欠缺,污染物排放近年来均位于全国较高水平,整体经济效益转换能力弱,从而导致了西部地区大部分年份的生态效率值为全国最低水平。(3) 南北均衡发展之势略有减弱。整体来说,南部区域生态效率值略高于北方,但2019年后,南北差距略有扩大之势,如2019年南北生态效率均值绝对差值首次超过0.10,2019年南方生态效率值高于0.25的区域数比北方区域多5个。(4) 生态效率值呈“沿海-内陆”递减分布。受要素禀赋优越、改革开放红利、国家政策等因素的影响,高效率区域多集中在北部、东部及南部沿海三大区域。

3 经济韧性与生态效率协同演化分析

3.1 序参量识别

为排除共线性对模型的干扰,采用线性回归的方法对经济韧性和生态效率进行共线性诊断,方差膨胀系数(VIF)小于5,二者不具备共线性。依照哈肯模型基本原理提出模型假设、构造演化方程并进行方程参数求解,结果见表3。其中,2001—2020年中国省域经济韧性和生态效率系统数据的拟合值由EVIEWS 12.0软件计算求得。

由表3的模拟结果可知,经济韧性(JRR)为序参量,各项参数为:$\lambda_1=0.004772>0$;$a=0.005961>0$;$\lambda_2=0.074923>0$;$b=-0.05628<0$。

系统演化方程:

$$\dot{q}_1=-0.00477q_1+0.004478q_1^3 \tag{9}$$

系统势函数:

$$v=0.002386q_1^2-0.00112q_1^4 \tag{10}$$

令$\dot{q}_1=0$,可得势函数解为:$q_1^*=0$, $q_1^{**}=1.032336$, $q_1^{***}=-1.032336$。由于q_1^*是不稳定解,并且经济韧性和生态效率值均大于0,因此系统演化方程只考虑大于0的部分。由此可知,系统稳定点为(1.032336, 0.001271)。利用式(6)可得系统状态评价函数为:

$$d=\sqrt{(q-1.032336)^2+[v(q)-0.001271]^2} \tag{11}$$

3.2 经济韧性与生态效率协同演化时空特征

基于改进哈肯模型所计算得到的省域经济韧性与生态效率协同水平及核密度估计曲线如图6所示。全国整体变化上,2001—2020年全国协同均值依照降低幅度可大致以2005年及2017年为分水岭

表3 2000—2020年哈肯模型计算结果

Tab. 3 Results of the Harken model from 2001 to 2020

假设条件	演化方程	控制参量	结论
$q_1=\mathrm{EGG}$ $q_2=\mathrm{JRR}$	$\ln\mathrm{EGG}_{(t)}=0.816068\ln\mathrm{EGG}_{(t-1)}(***)-$ $0.079511\ln\mathrm{EGG}_{(t-1)}\ln\mathrm{JRR}_{(t-1)}-0.151525$ $\ln\mathrm{JRR}_{(t)}=1.001325\ln\mathrm{JRR}_{(t-1)}(***)-$ $0.005506[\ln\mathrm{EGG}_{(t-1)}]^2+0.045938$	$\lambda_1=0.183932$ $\lambda_2=-0.001325$ $a=-0.079511$ $b=-0.005506$	a.拟合方程成立 b.不满足“绝热近似”假设 c.假设不成立
$q_1=\mathrm{JRR}$ $q_2=\mathrm{EGG}$	$\ln\mathrm{JRR}_{(t)}=0.995228\ln\mathrm{JRR}_{(t-1)}(***)-$ $0.005961\ln\mathrm{JRR}_{(t-1)}\ln\mathrm{EGG}_{(t-1)}+0.037348$ $\ln\mathrm{EGG}_{(t)}=0.925077\ln\mathrm{EGG}_{(t-1)}(***)-$ $0.05628[\ln\mathrm{JRR}_{(t-1)}]^2-0.043988$	$\lambda_1=0.004772$ $\lambda_2=0.074923$ $a=0.005961$ $b=-0.05628$	a.拟合方程成立 b.满足“绝热近似”假设 c.假设成立

注:***表示模型在1%水平下显著;q_1为序参量;q_2为受到序参量控制的快变量;EGG与JRR分别为生态效率和经济韧性;lnEGG与lnJRR分别为生态效率和经济韧性的自然对数;t为时间变量;λ_1和λ_2为阻尼系数;a和b为回归系数。

划分为三阶段，前期保持平稳、中期持续下降、后期继续保持平稳：2001—2004年为平稳期，两者协同均值大致稳定在0.828左右；2005—2016年为下降期，协同均值从0.808缓慢下降至0.657，降幅为0.148，年均降幅基本均大于0.01；2017—2020年进入平稳期，协同均值大致稳定在0.642左右；全国变异系数呈上升趋势，增长速率大致呈“M”型，由2002年的3.65%波动式增至2009年的14.51%，再降至2010年的5.42%，而增至2016年的13.71%，最后下降至2020年的2.81%。区域层面上，八大综合经济区协同值排序为东部沿海<北部沿海<南部沿海<黄河中游<东北地区<长江中游<西南地区<西北地区，但基本不存在阶梯性失衡现象。除东部沿海地区协同均值为全国均值的0.88倍外，其他区域协同均值均在全国平均水平上下10%的范围内浮动。

动态演进趋势上，研究期间内全国经济韧性协同核密度曲线总体呈现由高值区向低值区集聚、波峰由高至低、双峰至单峰的演化趋势，且曲线在不同年份上的形状和扁平程度波动较大，协同效应波动性明显。(1) 分布位置上，2001—2020年核密度估计曲线总体左移，但左移幅度分布不均，呈由小到大、再到小的趋势。具体来说，2004—2007年左移幅度最大，而2017—2020年基本未发生左移，说明经济韧性和生态效率两者间的协同效应持续下降，下降幅度由慢至快，再至慢。(2) 分布形态上，核密度估计曲线具有波峰下降、波宽增加、双峰转化为单峰的特征。曲线波峰整体呈趋缓走势但趋缓速度逐渐下降，波峰形状由2001年的“尖窄状”向2020年的“平台状”过渡，并且曲线宽度逐年增大，2020年曲线宽度约为2001年的2~3倍，表明省级区域经济韧性与生态效率协同演化降低速度放缓，并且区域差异呈分散趋势。(3) 延展性上，核密度估计曲线左侧拖尾存在逐年拉长、抬厚的现象，分布延展性存在一定的拓宽趋势，表明低值区省级区域数量占比增加，且协同值空间差距在逐年扩大。(4) 极化趋势上，曲线侧峰从2001到2004年逐渐趋缓，再到2007年逐渐转化为曲线左侧拖尾上的不明显凸起，表明两极化趋向消失，单极化特征愈加明显。

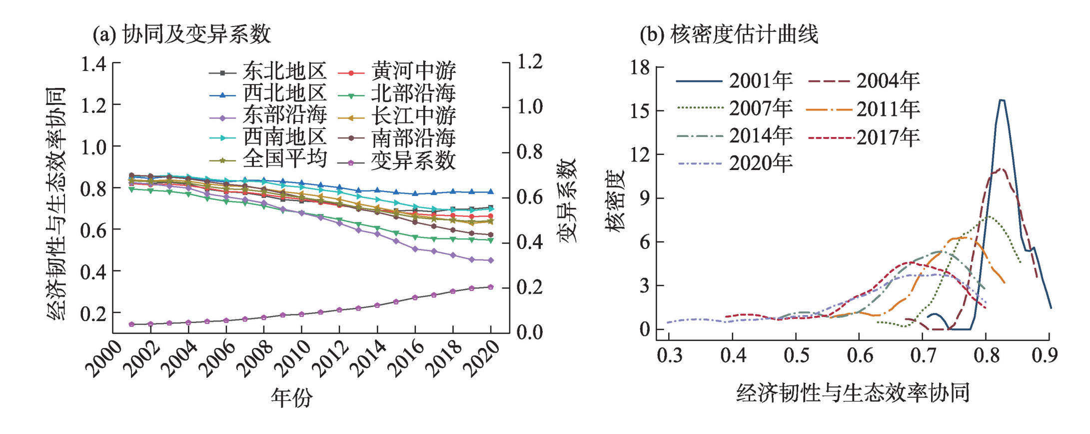


图6　2001—2020年中国省域经济韧性与生态效率协同及核密度估计曲线

Fig. 6　Synergistic levels of economic resilience and eco-efficiency and kernel density curves for provincial units in China from 2001 to 2020

为进一步探究全国经济韧性和生态效率协同的空间演化特征，利用自然断点法进行聚类划分：高级协同阶段[0.807, 0.893)、中高级协同阶段[0.742, 0.807)、中级协同阶段[0.660, 0.742)、初中级协同阶段[0.528, 0.660)和初级协同阶段[0.297, 0.528)，并选取2001、2011、2020年及2001—2020年4个时间进行可视化(图7)。(1) 总体上，全国经济韧性与生态效率协同值较低区域呈由点到面、由东至中西部、由沿海向内地进行蔓延，具体由北部沿海、东部沿海及南部沿海等区域向黄河中游、长江中游、东北地区、西南地区、西北地区等区域进行塌缩蔓延。2001年全国仅有北京为中级协同阶段，河北、江苏及广州为中高级协同阶段，均位于北部沿海、东部沿海、南部沿海区域；2011年中级协同及初中级协同阶段区域波及黄河中游、长江中游，中高级协同区域波及全国，但仍有高级协同区域；2020年青海、宁夏、贵州由高级协同区域转为中高级协同阶段，全国均处在中高级协同及以下阶段。

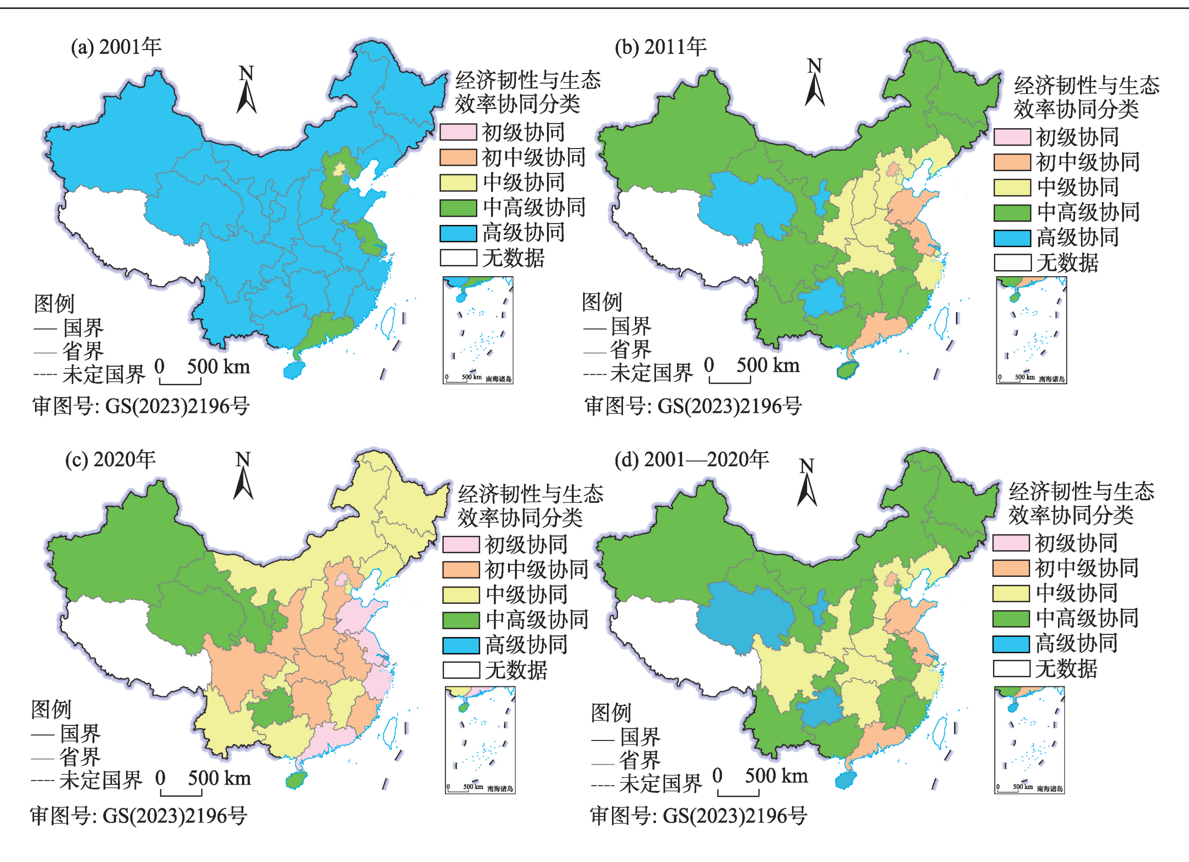


图7 经济韧性与生态效率协同的空间分异特征

Fig. 7 Spatial differentiation characteristics of synergistic levels between economic resilience and eco-efficiency

(2) 中国南北地区协同值总体差距不大,依照孰强孰弱可以2016年划分为两阶段,前期南方地区协同值高于北方地区、后期北方区域高于南方地区。依照南北协同差距值,可进一步以2013年为分界点将前期阶段划分为两阶段:2001—2012年为稳定阶段,南北差距虽有轻微先增加后缩小趋势,但整体基本保持稳定,围绕0.026上下波动;2013—2015年为快速下降阶段,南北区域经济韧性与生态效率协同差值下降速度相对较快。(3) 协同值较低区域多见沿海与江河省份,如2020年初级协同省份均位于北部、东部及南部沿海区域,初中级协同省份位于长江及黄河中游区域的数目占全国62.5%。(4) 西北地区协同程度最为稳定。2001—2020年宁夏、新疆、甘肃及青海经济韧性与生态效率间的协同值降幅全国最低,均未超过0.1,协同等级均为中高级及以上。

4 讨论

本文经济韧性所得结论与谢会强等[30]、高粼彤等[31]研究结论相一致,生态效率所得结论与郑德凤等[32]、沈伟腾等[33]研究结果相比,整体演变趋势相同,但变化趋势存在差异,主要在于研究视角、评价指标选取及衡量标准等方面的不同。本研究主要贡献是把经济韧性与生态效率置于同一分析框架之中,通过分析探讨了我国经济韧性、生态效率的时空特征及二者间的协同演化趋势,一定程度上拓展了当前经济韧性相关研究视角与案例应用。研究结果表明经济韧性和生态效率间存在一定的竞合关系。未来应以构建"双循环"相互促进的新发展格局为契机,加强全局谋划与战略布局,以供给侧改革、产业结构优化、科学技术创新为支点,促进城市经济要素有机整合,建立以市场为导向且兼顾效率与韧性的资源均衡配置系统,促进经济韧性和生态效率两者间的正向作用形成,以实现复杂经济系统的可持续发展与高质量发展。与此同时,本文仅讨论了经济韧性与生态效率的水平及协同发展状态,对空间差异驱动机制和优化路径探讨不足,未来需进一步探讨,并且本文研究对象为省级区域,在市县级尺度层面仍有待研究。

5 结论

（1）经济韧性方面。总体上，经济韧性在样本观测期间内显著上升；区域上，区域差异呈扩张态势；动态演进上，国内经济韧性水平趋于分散、绝对差异有所增大、单极化特征明显；空间分布上，南北区域发展不均衡，经济韧性水平具体由“北强南弱”向“南强北弱”转化，呈现一定的“东-中-东北-西”阶梯效应，并且城市群优势凸显，高韧性区域多为成熟城市群核心省份。

（2）生态效率方面。总体上，全国及各区域生态效率呈下降趋势，部分省份生态效率先下降后上升；区域上，全国变异系数曲线呈斜“N”型，区域间存在显著性阶梯失衡，其差异历经“扩张-缩小-再扩张”变化；动态演进上，核密度曲线总体呈现位置先左移而后略右移、峰态从“势均力敌”到“一强多弱”、峰值先增后减的态势，表明全国生态效率总体水平不高、集中度先动态收敛后扩大、区域绝对差异先缩后增；空间分布上，全国生态效率值大面积坍缩，总体呈“沿海-内陆”递减分布，南北均衡发展之势略有减弱。

（3）经济韧性与生态效率协同演化方面。序参量上，经济韧性是中国经济韧性与生态效率协同演化的序参量，役使生态效率并主导二者协同演化的路径与方向；总体变化上，协同演化以2005年及2017年为时间节点划分为稳定、下降及稳定三阶段；区域上，全国变异系数以“M”型速率上升，区域差异呈微弱的扩大趋势，南北区域差异较小，基本不存在阶梯性失衡现象；动态演进上，核密度曲线位置左移、波峰高度下降、波峰形状由“尖窄状”向“平台状”过渡、波宽增加、双峰转单峰，具有明显的“左拖尾”和侧峰趋势弱化的特征，表明经济韧性与生态效率协同值趋于分散、绝对差异有所增加；空间分布上，全国经济韧性与生态效率协同值较低区域呈由点到面、由东至中西部、由沿海向内地进行蔓延，西北区域协同程度最为稳定。

参考文献（References）

[1] Mou Y, Luo Y, Su Z, et al. Evaluating the dynamic sustainability and resilience of a hybrid urban system: Case of Chengdu, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 291: 125719, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125719.

[2] 周成, 赵亚玲, 张旭红, 等. 黄河流域城市生态韧性与效率时空演化特征及协调发展分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(9): 1514-1523. [Zhou Cheng, Zhao Yaling, Zhang Xuhong, et al. Spatiotemporal evolutionary characteristics and coordinated development of urban ecological resilience and efficiency in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(9): 1514-1523.]

[3] 白帅, 吴金华, 王祯. 河南省城市韧性与土地利用效率的耦合协调性[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 308-316. [Bai Shuai, Wu Jinhua, Wang Zhen. Coupling relationship between urban resilience and landuse efficiency in He'nan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 308-316.]

[4] 张智光. 绿色经济模式的演进脉络与超循环经济趋势[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(1): 78-89. [Zhang Zhiguang. Evolution paths of green economy modes and their trend of hypercycle economy[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(1): 78-89.]

[5] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[EB/OL]. [2022-10-16]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm. [Xi Jinping. Hold high the great banner of socialism with chinese characteristics and strive in unity to build a modern socialist country in all respects: Report to the 20th National Congress of the Communist Party of China[EB/OL]. [2022-10-16]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.]

[6] 巩灿娟, 张晓青, 徐成龙. 中国三大城市群经济韧性的时空演变及协同提升研究[J]. 软科学, 2022, 36(5): 38-46. [Gong Canjuan, Zhang Xiaoqing, Xu Chenglong. Study on the spatial-temporal evolution and collaborative improvement of economic resilience of three major urban agglomerations in China[J]. Soft Science, 2022, 36(5): 38-46.]

[7] 王晓, 李娇娇, 王星苏. 创新型城市试点有效提升了城市经济韧性吗?[J]. 投资研究, 2022, 41(5): 120-143. [Wang Xiao, Li Jiaojiao, Wang Xingsu. Does the pilot of innovative cities effectively improved the urban economic resilience?[J]. Review of Investment Studies, 2022, 41(5): 120-143.]

[8] 李连刚, 张平宇, 谭俊涛, 等. 韧性概念演变与区域经济韧性研究进展[J]. 人文地理, 2019, 34(2): 1-7, 151. [Li Liangang, Zhang Pingyu, Tan Juntao, et al. Review on the evolution of resilience concept and research progress on regional economic resilience[J]. Human Geography, 2019, 34(2): 1-7, 151.]

[9] 孙久文, 孙翔宇. 区域经济韧性研究进展和在中国应用的探索[J]. 经济地理, 2017, 37(10): 1-9. [Sun Jiuwen, Sun Xiangyu. Research progress of regional economic resilience and exploration of its application in China[J]. Economic Geography, 2017, 37(10): 1-9.]

[10] 王素素, 卢现祥, 李磊. 中国经济韧性的南北差异及形成机理[J]. 南方经济, 2022(6): 77-98. [Wang Susu, Lu Xianxiang, Li Lei. The north-south differences in China's economic resilience

and its formation mechanism[J]. South China Journal of Economics, 2022(6): 77−98.]
[11] Schaltegger S, Sturm A. Ökologische rationalität: Ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten managementinstrumenten[J]. Die Unternehmung, 1990, 44(4): 273−290.
[12] 阎晓, 涂建军. 黄河流域资源型城市生态效率时空演变及驱动因素[J]. 自然资源学报, 2021, 36(1): 223−239. [Yan Xiao, Tu Jianjun. The spatio-temporal evolution and driving factors of eco-efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1): 223−239.]
[13] 崔许锋, 王雨菲, 张光宏. 面向低碳发展的农业生态效率测度与时空演变分析——基于SBM-ESDA模型[J]. 农业经济问题, 2022(9): 47−61. [Cui Xufeng, Wang Yufei, Zhang Guanghong. Low-carbon oriented measurement and spatiotemporal evolution of agricultural eco-efficiency in China: Based on SBM-ESDA model [J]. Issues in Agricultural Economy, 2022(9): 47−61.]
[14] 李爽, 郭燕青. 新能源汽车企业创新生态效率测度——基于2012—2015年面板数据的实证分析[J]. 软科学, 2017, 31(4): 23−26. [Li Shuang, Guo Yanqing. The measurement on innovation ecological efficiency of new energy automobile enterprises: Empirical analysis based on panel data from 2012 to 2015[J]. Soft Science, 2017, 31(4): 23−26.]
[15] Meeusen W, van den Broeck J. Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error[J]. International Economic Review, 1977, 18(2): 435−444.
[16] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429−444.
[17] Ruan J, Chen Y, Yang Z. Assessment of temporal and spatial progress of urban resilience in Guangzhou under rainstorm scenarios [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 66: 102578, doi: 10.1016/j.ijdrr.2021.102578.
[18] Simmie J, Martin R. The economic resilience of regions: Towards an evolutionary approach[J]. Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, 2010, 3(1): 27−43.
[19] 张悦倩, 刘全龙, 李新春. 长三角城市群城市韧性与新型城镇化的耦合协调研究[J]. 城市问题, 2022(5): 17−27. [Zhang Yueqian, Liu Quanlong, Li Xinchun. Spatiotemporal evolution of the coupling coordination of urban resilience and new urbanization in the urban agglomeration of Yangtze River delta[J]. Urban Problems, 2022(5): 17−27.]
[20] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130 (3): 498−509.
[21] 侯孟阳, 姚顺波. 中国城市生态效率测定及其时空动态演变[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(3): 13−21. [Hou Mengyang, Yao Shunbo. Measuremenl and temporal-spalial dynamic evolulion of urban eco-ellicieny in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(3): 13−21.]
[22] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32−41.
[23] 刘华军, 石印. 中国农业生态效率的空间分异与提升潜力[J]. 广东财经大学学报, 2020, 35(6): 51−64. [Liu Huajun, Shi Yin. Spatial differentiation and promotion potential of agricultural eco-efficiency in China[J]. Journal of Guangdong University of Finance & Economics, 2020, 35(6): 51−64.]
[24] 李琳, 刘莹. 中国区域经济协同发展的驱动因素——基于哈肯模型的分阶段实证研究[J]. 地理研究, 2014, 33(9): 1603−1616. [Li Lin, Liu Ying. The driving forces of regional economic synergistic development in China: Empirical study by stages based on Haken model[J]. Geographical Research, 2014, 33(9): 1603−1616.]
[25] 李亚丽, 杨粉莉, 杨联安, 等. 近40 a榆林市土地利用空间格局变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 1011−1021. [Li Yali, Yang Fenli, Yang Lian'an, et al. Spatial pattern changes and influencing factors of land use in Yulin City in the past 40 years[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 1011−1021.]
[26] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000[J]. 经济研究, 2004(10): 35−44. [Zhang Jun, Wu Guiying, Zhang Jipeng. The estimation of China's provincial capital stock: 1952—2000[J]. Economic Research Journal, 2004(10): 35−44.]
[27] Guan Y, Shan Y, Huang Q, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts[J]. Earth's Future, 2021, 9(11): e2021EF002241, doi: 10.1029/2021EF002241.
[28] 徐圆, 张林玲. 中国城市的经济韧性及由来: 产业结构多样化视角[J]. 财贸经济, 2019, 40(7): 110−126. [Xu Yuan, Zhang Linling. The economic resilience of Chinese cities and its origin: From the perspective of diversification of industrial structure[J]. Finance & Trade Economics, 2019, 40(7): 110−126.]
[29] 陈晓兰, 孟庆港, 史佳凝, 等. 中国八大综合经济区生态效率测度及时空演进分析[J]. 经济与管理评论, 2022, 38(2): 109−121. [Chen Xiaolan, Meng Qinggang, Shi Jianing, et al. Ecological efficiency measurement and analysis of spatial-temporal evolution in eight comprehensive economic areas of China[J]. Review of Economy and Management, 2022, 38(2): 109−121.]
[30] 谢会强, 杨丹, 张宽. 中国城市经济韧性的时空演化及网络结构研究[J]. 华东经济管理, 2022, 36(11): 64−74. [Xie Huiqiang, Yang Dan, Zhang Kuan. Spatio-temporal evolution and network structure of urban economic resilience in China[J]. East China Economic Management, 2022, 36(11): 64−74.]
[31] 高粼彤, 孟霏, 田启波. 中国经济韧性时空演化及影响因素研究——基于数字金融视角[J]. 经济问题探索, 2022(8): 57−74. [Gao Lintong, Meng Fei, Tian Qibo. Study on the temporal and spatial evolution and influencing factors of China's economic resilience: From the perspective of digital finance[J]. Inquiry into Economic Issues, 2022(8): 57−74.]
[32] 郑德凤, 郝帅, 孙才志, 等. 中国大陆生态效率时空演化分析及其趋势预测[J]. 地理研究, 2018, 37(5): 1034−1046. [Zheng De-

feng, Hao Shuai, Sun Caizhi, et al. Spatio-temporal pattern evolution of eco-efficiency and the forecast in mainland of China[J]. Geographical Research, 2018, 37(5): 1034-1046.]

[33] 沈伟腾, 胡求光, 李加林, 等. 中国区域生态效率的时空演变及空间互动特征[J]. 自然资源学报, 2020, 35(9): 2149-2162. [Shen Weiteng, Hu Qiuguang, Li Jialin, et al. Spatio-temporal evolution and spatial interaction of regional eco-efficiency in China[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(9): 2149-2162.]

Measurement and synergistic evolution analysis of the economic resilience and eco-efficiency of provincial regions in China

ZHOU Xia, WANG Jia

(Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Integrating the dynamic balance between economic resilience and eco-efficiency is important for achieving sustainable regional development. This study focuses on 30 provincial units in China from 2001 to 2020 as the research objects. Economic resilience, measured within the framework of the domestic provincial, regional adaptive cycle theory, and the driving-pressure-state-response (DPSR) model, was assessed using the combined weight model. Eco-efficiency, evaluated under the input-output theory, employed the global undesired superefficient slack based measurement (SBM) model. The synergistic evolutionary characteristics of economic resilience and eco-efficiency were elucidated using an improved Harken model. The results indicate the following factors: (1) Economic resilience substantially increased during the sample observation period, accompanied by notable regional differences and unbalanced development in the north and south regions, exemplifying a certain "East-Central-Northeast-West" ladder effect. (2) The overall trend of eco-efficiency levels decreased, with regional differences undergoing the phases of "expansion-shrinking-re-expansion". This was marked by a considerable step imbalance and a decreasing spatial distribution from "coastal-inland". (3) The synergistic evolution between economic resilience and eco-efficiency progressed through three stages of stabilization, decline, and stability. Importantly, no step imbalance was observed between these regions. Economic resilience, serving as a sequential parameter of synergistic evolution, emerges as the dominant factor influencing the sustainable development of the region.

Key words: economic resilience; eco-efficiency; synergistic evolution; global undesired superefficient SBM model; China